干旱区地理
ARID LAND GEOGRAPHY

贺兰山银川段不同重现期山洪灾害风险与影响区划研究

崔　洋[1,2]，　常倬林[1,3]，　左河疆[1,2]，　王建英[1]
（1　宁夏气象防灾减灾重点实验室，宁夏　银川　750002；2　宁夏气候中心，宁夏　银川　750002；
3　宁夏气象灾害防御技术中心，宁夏　银川　750002　）

摘　要： 为评估贺兰山银川段山洪灾害风险程度及其影响，利用高分辨率数字高程模型（DEM）、行政区划、水系和自动气象站历史降水数据，以及居民点、学校、桥梁等社会经济信息资料，采用FloodArea模型模拟与ArcGIS空间叠加统计分析相结合的方法，分析研究了贺兰山银川段不同重现期山洪灾害风险分布特征，及其对人口、土地利用和国内生产总值（GDP）的影响。结果表明：（1）贺兰山银川段10～100 a一遇山洪灾害低、中、高风险区面积分别为109.5～276.3 km^2、45.0～231.0 km^2、13.4～204.3 km^2，同一风险等级的山洪灾害区划面积随着重现期增大呈显著增大趋势。（2）贺兰山10 a和20 a一遇山洪灾害风险区主要位于海拔1 130～1 450 m的山洪沟及其两侧区域，50 a一遇山洪灾害风险区主要集中在山洪沟下游和山前海拔1 130～1 180 m的冲击扇区，100 a一遇山洪灾害风险区覆盖整个山前海拔1 120～1 350 m的区域和冲击扇区。随着重现期增大，贺兰山山洪灾害风险区具有向上游（下游）区域扩展较慢（更快）的显著特征。（3）银川市受贺兰山10 a、20 a、50 a和100 a一遇山洪灾害影响总人口分别为7.30×10^4人、9.87×10^4人、1.65×10^5人和2.39×10^5人。随着山洪重现期增大，受灾害影响总人口呈显著增加趋势，低、中、高风险区受影响人口增速分别在−12.4%～20.5%、48.6%～91.8%、163%～300%之间。（4）农田、草地受贺兰山山洪灾害影响最大，二者合计占受影响土地总面积的比例在82.1%～86.9%之间；其次是建设用地和耕地，两者占受影响土地总面积的比例在4.4%～9.1%和1.1%～4.6%之间，是银川市贺兰山山洪灾害防御的重点区域。（5）银川市受贺兰山10 a、20 a、50 a、100 a一遇山洪灾害中、高风险区影响的GDP合计分别为1.12×10^9元、2.00×10^9元、4.70×10^9元、8.74×10^9元；发生超50 a一遇山洪灾害时，沿山农业和工业产业、基础公共设施等会遭受较大经济损失。

关 键 词： 山洪灾害；风险与影响区划；FloodArea模型；ArcGIS；贺兰山银川段

文章编号： 1000－6060(2020)04－0859－12(0859～0870)

山洪是山区小流域由降水引起的突发性、暴涨暴落的地表径流[1－3]，具有水量集中、流速大、破坏性强、易造成人员伤亡，以及地域性差异大、预测预防难度大的特点。同时，山洪及其诱发的泥石流、滑坡灾害破坏力极强，对国民经济和人民生命财产造成损失严重[4]，灾后恢复工作难度大。国际气象组织对全球139个主要国家自然灾害造成损失的调查结果显示，山洪灾害排在第一、第二位的国家有105个[5]。我国山洪灾害在活动强度、暴发规模、经济损失、人员伤亡等方面均居世界前列。进入21世纪，我国山洪灾害频发，平均每年造成的死亡人数占全部洪涝灾害死亡人数的80%左右[6]，且伤亡人数占洪涝灾害死亡总人数的比例呈上升趋势[7]，对工农业发展和人民生命财产安全造成的危害不断

收稿日期： 2019－10－01；　**修订日期：** 2020－02－29
基金项目： 宁夏自然科学基金项目（2020AAC03465）；宁夏自治区青年拔尖人才培养专项（RQ0022）；宁夏气象局气象科技创新领军人才专项资助
作者简介： 崔洋（1982－），男，宁夏吴忠人，正研级高工，主要从事气候变化、生态环境变化、数值模拟研究. E-mail：cuiyang@cma.gov.cn

增大。

风险区划评估既是山洪灾害研究的重要内容，也是开展灾害防治工作的基础。美国、英国、瑞典、日本等发达国家从20世纪50年代就已开始山洪风险区划评估研究，并取得了大量丰硕的成果[8-13]。我国的山洪灾害风险研究开始于20世纪80年代，根据地形地质条件、历史暴雨灾害分省灾情、洪水强度、洪水频率、国民经济等资料，学者们对全国山洪灾害风险开展了宏观区划与分析评价[14-15]，形成了中国洪涝灾害风险区划图[16-18]。在此基础上，又针对各省区及一些典型流域，开展了山洪灾害风险和影响区划、评估技术方法研究[19-20]。刘少军等[21]利用降水、灾害资料和海南岛DEM数据，通过ArcGIS软件绘制了海南全岛140个小流域单元山洪灾害风险图。宫清华等[22]从洪灾主要成灾因子出发，按照风险评估理论方法对自然致灾因子危险性、承载体易损性和抗灾指数指标进行叠加，得到了以县为单元的广东省洪涝灾害综合风险区划图。岳琦等[23]选取多年降水、土壤类型、坡度、高程、人口密度、地均GDP等12项因子，采用GIS空间叠加分析得出了福建闽江上游区域山洪灾害风险区划图。唐川等[24]从危险评价与易损性评价方面选择评估因子，开展了红河流域的山洪灾害风险区划。丁文峰等[25]从自然灾害风险概念出发，分析形成了四川省山洪灾害风险区划图。邹朝望等[26]以受灾率、成灾率、降水变率、脆弱度、灾害损失率等为主要指标，对湖南省洪涝灾害风险时空分布特征进行了区划评估。刘敏等[27]开展了湖北省雨涝灾害风险程度空间差异综合评价，将湖北省雨涝灾害划分为极重度、重度、中度和轻度4个风险区。管珉等[28]从影响山洪灾害形成与发展的各种因子出发，将危险性与易损性评价结果进行叠加，完成了江西省山洪灾害风险区划。谢五三[29]和王胜等[30]分别利用国家气象站及区域自动气象站逐小时降水量、数字高程模型、土地利用、土壤类型以及实地灾情调查等资料，采用FloodArea洪水淹没模拟叠加承载体信息的方法，开展了安徽省大通河和淠河流域暴雨洪涝灾害风险区划研究，并绘制了风险区划图谱。曹罗丹等[31]以危险性、暴露性、脆弱性及防灾减灾能力等为主要指标，通过GIS构建的洪涝灾害风险评估模型对浙江省洪涝灾害进行了风险评估。张洪玲等[32]以历史逐日降水、地理信息、灾情和社会经济数据为基础，采用加权综合分析法和GIS中自然断点分级法，将黑龙江省划分为了高、次高、中等、次低和低5个等级风险区。周金星等[33]在分析了北京山区山洪灾害发生成因和特点的基础上，建立了北京山洪及泥石流灾害空间预报信息系统。张世才等[34]根据自然地貌、水文、气象和山洪灾害等调查资料，给出了祁连山区典型流域风险区划结果。李永红等[35]基于1:25万数字地形地质图，按照高易发、中易发和低易发等级，将陕北风沙高原、黄土高原与陕南秦巴山地山洪灾害区划为18个风险区。这些成果不仅在山洪灾害预警防治方面发挥了重要作用，也是避免或减少山洪灾害损失的有效的途径。

进入21世纪以来，宁夏山洪灾害受灾人口、死亡人数以及直接经济损失呈不断增加趋势，鲜有学者开展宁夏境内山洪灾害风险区划研究。贺兰山银川段多年平均降雨量在180～400 mm，有较大山洪沟20余条；由于山地植被稀疏，山坡陡峻，山前洪积平原面积大，山洪暴发频繁。自1960年以来，银川段共发生较大山洪约40余次；1998年以来，共发生较大山洪6次，平均2年1次。贺兰山的暴雨山洪灾害已经给银川市群众生命财产和城市安全带来了严重威胁。本文利用地形、水系图、历史降水和洪水灾害资料，以及人口、经济、土地利用类型等基础数据，采用FloodArea模式模拟与ArcGIS叠加分析结合的方法，分析区划贺兰山银川段山洪灾害风险程度，研究评估不同风险等级对银川市人口、社会经济影响的时空分布特征，以期为银川市制定贺兰山防洪减灾救灾规划，为政府防洪减灾、减轻山洪灾害损失提供科学依据和参考，对提升宁夏山洪灾害防御能力具有重要理论指导意义。

1 研究区域及方法

1.1 研究区域

选取贺兰山银川段为研究区域(图1)。所用资料包括：区域内各类气象站的站名、站号、地理坐标等基础信息，西夏区、金凤区、兴庆区、贺兰县、永宁县、灵武市辖区内4个国家基本气象站1961年1月1日～2017年12月13日和216个区域自动气象站2006年1月1日～2017年12月13日逐时降水历史序列资料；研究区域30 m分辨率的数字高程模型

(DEM)、比例尺为1:50000的行政区划、行政区水系图、气象水文监测站点地理坐标数据,以及历史洪水灾害、居民点、人口、土地利用、GDP等社会经济信息数据。

1.2　FloodArea模型及试验

FloodArea模型由德国Geomer公司开发,是基于GIS栅格数据构建的二维非恒定流的水动力模型[36]。该模型内嵌于ArcGIS平台,计算基于水动力方法,同时考虑了1个栅格的周围8个单元(图2)。相邻单元的流量长度被认为是相等的,位于对角线的单元,以不同的长度算法来计算,对邻近栅格单元的泻入量由manning-stricker公式计算[37]。淹没过程中水流方向由地形坡向所决定,水流的淹没深度为淹没水位高程和地面高程之间的差值。不同于静态洪水风险区划图,FloodArea在每个运行时相都会模拟计算出淹没范围和水深,并以栅格文件的形式存储和显示出来[38]。近年来,随着GIS技术的不断发展,ArcGIS矢量数据空间分析与FloodArea水动力模型相结合的研究技术在山洪灾害风险和影响区划领域逐渐得到了广泛的应用和推广。根据贺兰山东麓银川段山洪沟实际情况,选用暴雨淹没情景开展FloodArea山洪模拟试验。

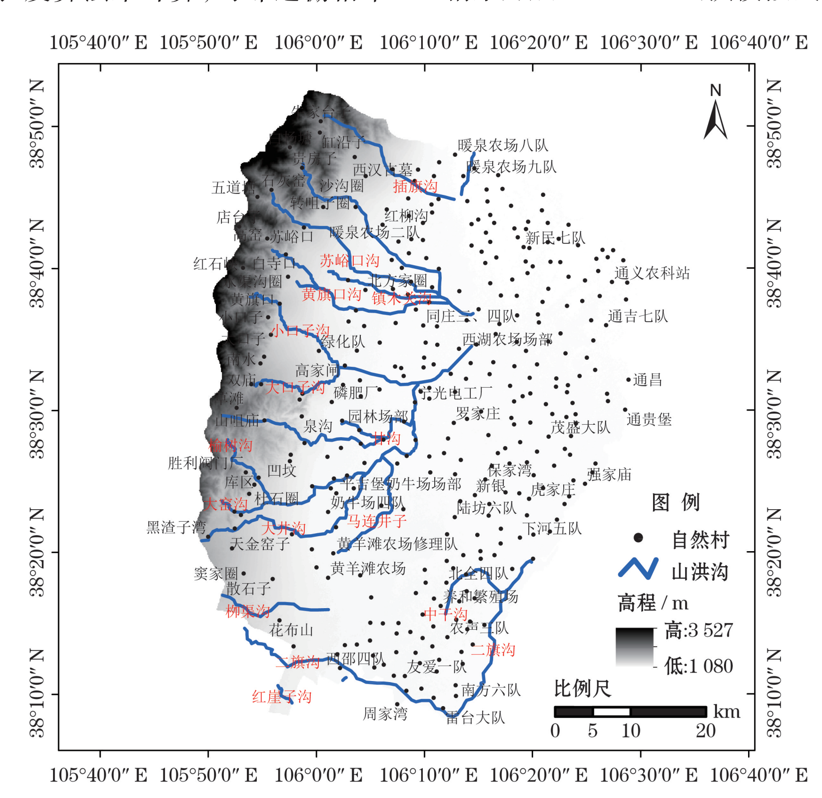


图1　研究区域地形、山洪沟、村庄分布图

Fig. 1　Distribution of topography, flash flood ditches and villages

首先利用多概率分布函数拟合工具(MuDFiT)软件,根据贺兰山银川段自动气象站历史逐小时长序列降水量数据,采用不同概率密度分布函数对降水序列进行拟合,通过最大似然法估计函数参数,计算得到不同重现期(10 a、20 a、50 a、100 a一遇)极端降水事件的降水量,从中筛选最符合实际情况的作为重现期极端事件的降水量;通过ArcGIS中的克里金插值处理工具,生成覆盖整个研究区域的不同重现期(10 a、20 a、50 a、100 a一遇)的降雨量栅格面数据。其次,利用研究区域致灾面雨量及小时降水序列数据,分析典型降水过程时长,计算得到各小时降水概率,确定小时降水雨型分布,建立贺兰山

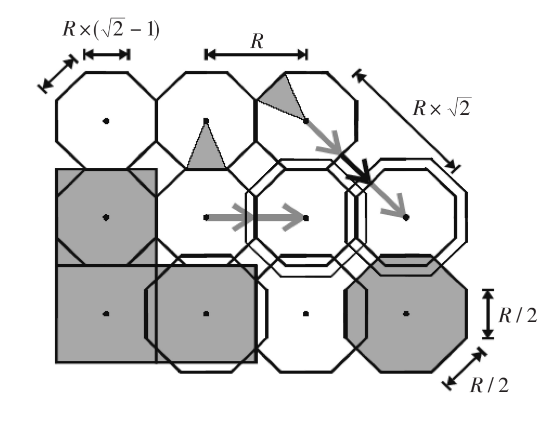


图2　FloodArea模型汇流计算原理示意图[39]

Fig. 2　Sketch map of convergence calculation principle for FloodArea model[39]

银川段不同重现期典型降水过程。最后，将计算得到的不同重现期致灾面雨量、小时雨型分布、DEM、Manning系数等参数和植被等下垫面数据输入FloodArea水文模型开展山洪模拟试验，得到贺兰山银川段不同重现期山洪过程淹没栅格数据。

1.3 区划评估方法

在不同重现期山洪过程模拟淹没栅格数据基础上，利用ArcGIS制图、数据管理、空间分析、数据编辑和地理处理等分析技术和工具，分析评估贺兰山银川段山洪灾害风险等级及其影响。首先，利用ArcGIS制图功能绘制FloodArea模拟的不同重现期山洪淹没图。依据淹没深度(h)，结合历史灾情，将贺兰山银川段山洪灾害风险分为三级：低风险(0.2 m＜h≤0.6 m)、中风险(0.6 m＜h≤1.2 m)、高风险(h＞1.2 m)。其次，利用ArcGIS空间插值功能对人口、GDP以及土地利用等指标因子做栅格化处理，使其分布到空间网格上。以精细化土地利用类型为基础，确定山洪在不同土地类型上灾害脆弱性系数，提取每个单元网格的脆弱性系数并进行插值，得到贺兰山银川段山洪灾害在不同土地类型上的脆弱性，并叠加人口、社会经济栅格分布数据，对承灾体潜在易损性进行分析。最后，利用Zonal Statistics as Table统计和栅格叠加分析工具，根据不同重现期的重分类数据，判断相同单元格内不同风险等级对土地利用的影响值，并根据栅格值提取；按照3个风险等级统计GDP和人口数据，得到淹没水深对GDP和人口等的影响值；通过制图工具制作得到贺兰山银川段山洪灾害风险影响区划图。

2 山洪灾害风险与影响区划分析

2.1 T年一遇山洪灾害风险区划

图3是基于FloodArea模型模拟的不同重现期典型山洪过程淹没深度栅格数据，叠加地形、山洪沟、自然村等基础信息，绘制的贺兰山银川段10 a、20 a、50 a、100 a一遇山洪灾害风险区划图。空间统计结果表明，贺兰山银川段区域10 a一遇山洪灾害低、中、高风险区面积分别为109.5 km^2、45.0 km^2、13.4 km^2，占整个区域总面积的比例分别为3.21%、1.32%、0.39%；20 a一遇山洪灾害低、中、高风险区面积分别为142.6 km^2、73.7 km^2、27.9 km^2，占整个区域总面积的比例分别为4.19%、2.17%、0.82%；50 a一遇山洪灾害低、中、高风险区面积分别为205.8 km^2、145.0 km^2、86.7 km^2，占整个区域总面积的比例分别为6.04%、4.26%、2.54%；100 a一遇山洪灾害低、中、高风险区面积分别为276.3 km^2、231.0 km^2、204.3 km^2，占整个区域总面积的比例分别为8.12%、6.79%、6.00%。总体而言，在同一重现期下，随着灾害风险由低逐渐增大到中、高等级，贺兰山银川段山洪灾害区划面积随之显著减小；而在同一风险等级条件下，当重现期由10 a一遇增大到100 a一遇时，贺兰山银川段山洪灾害区划面积呈显著增大趋势。

10 a一遇山洪灾害低、中、高风险区主要集中在海拔1 140～1 450 m的山洪沟及其两侧区域，插旗沟、贺兰口沟、苏峪口沟、黄旗口沟、小口子沟流域属于10 a一遇山洪灾害风险易发区。20 a一遇山洪灾害低、中、高风险区主要集中在海拔1 130～1 450 m的插旗沟、贺兰口沟、苏峪口沟、黄旗口沟、小口子沟、大口子沟、甘沟、榆树沟、大井沟流域，与10 a一遇山洪相比，低、中、高风险区面积将分别增加33.1 km^2、28.7 km^2、14.5 km^2。出现50 a一遇山洪时，贺兰山东麓海拔1 180～1 350 m的山洪沟，山前海拔1 130～1 180 m的大部分冲击扇区都将处于山洪灾害风险区中；与10 a一遇山洪相比，低、中、高风险区面积将分别增加96.3 km^2、100.0 km^2、73.3 km^2，增大0.88倍、2.22倍、5.47倍；从北到南的插旗沟、贺兰口沟、苏峪口沟、镇木关沟、黄旗口沟、小口子沟、大口子沟、甘沟、榆树沟、大窑沟、大井沟、柳渠沟、二旗沟等均属于灾害风险高发区。若遇到100 a一遇的极端山洪事件，灾害风险区会覆盖贺兰山东麓海拔1 120～1 350 m的所有山洪沟和整个山前冲击扇区域；低、中、高风险区面积将比10 a一遇分别增加166.8 km^2、186.0 km^2、190.9 km^2，增大1.52倍、4.13倍、14.25倍。上述结果亦表明，海拔1 140～1 180 m的山洪沟段、山前区域是贺兰山银川段山洪灾害风险易发区。随着山洪重现期增大，贺兰山银川段山洪灾害风险区会同时向高(低)海拔地区延伸，且具有向低海拔地区延伸速度更快的特点，不同等级风险区的扩展能力强弱依次为高风险、中风险、低风险。

2.2 山洪灾害对人口影响区划

为分析评估贺兰山银川段10 a、20 a、50 a、100 a一遇山洪灾害对银川市人口的影响，在叠加了整个

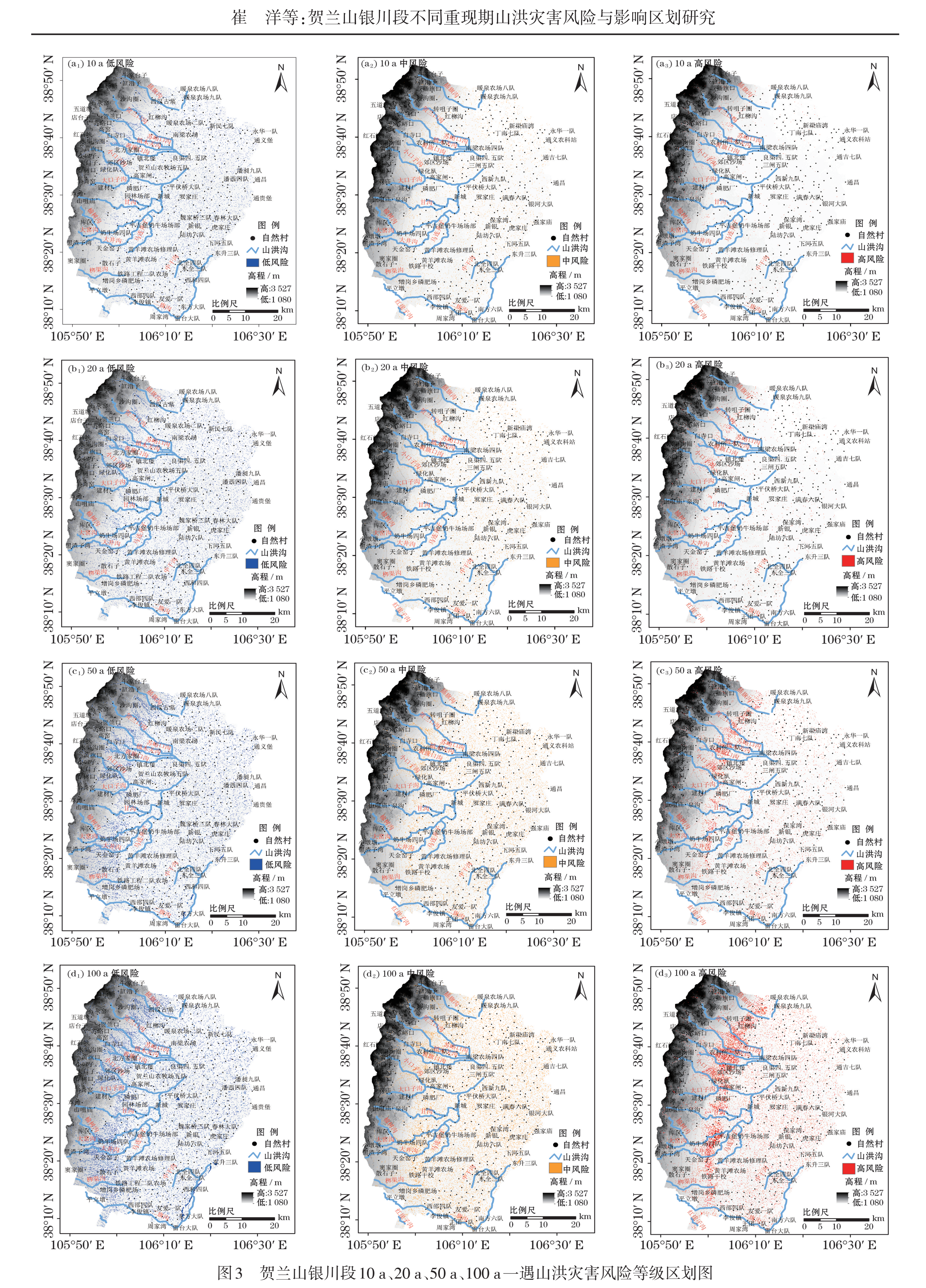


图3　贺兰山银川段10 a、20 a、50 a、100 a一遇山洪灾害风险等级区划图

Fig. 3　Risk zoning maps of 10 a, 20 a, 50 a and 100 a return period flash flood disasters in Yinchuan section of Helan Mountain

区域内自然村、社区人口数据的基础上，图4分析给出了贺兰山银川段不同重现期山洪灾害对人口影响区划图。发生10 a一遇山洪灾害时，暖泉农场、南梁牧场、北方家圈、镇北堡、绿化队、农垦局试验站、平吉堡农场、奶牛场一线山洪沟两侧附近村庄受影响较大，受影响人口低风险区为4.92×10^4人、中风险区为2.10×10^4人、高风险区为0.28×10^4人。发生20 a一遇山洪灾害时，暖泉农场、陈家沟、红柳沟、南梁农场、北方家圈、镇北堡、区干校、绿化队、磷肥厂、农机校、农垦局试验站、平吉堡农场、奶牛场、黄羊滩农场区域近1/3的村庄会受到较大影响，低、中、高风险区受影响人口分别为5.56×10^4人、3.56×10^4人、0.75×10^4人。出现50 a一遇山洪灾害时，沿暖泉农场、红柳沟、南梁农场、北方家圈、镇北堡、军马场、绿化队、农机校、农垦局试验站、平吉堡奶牛场、黄羊滩农场、西邵村一线50%的村庄都会受到严重影响，低、中、高风险区受影响人口分别为6.70×10^4人、6.83×10^4人、3.00×10^4人。当发生历史上极端少见的100 a一遇山洪灾害时，贺兰山银川段沿山海拔1 120 m以上区域近80%的村庄都会受到严重影响，低、中、高风险区受影响人口分别为5.87×10^4人、1.02×10^5人、7.88×10^4人。

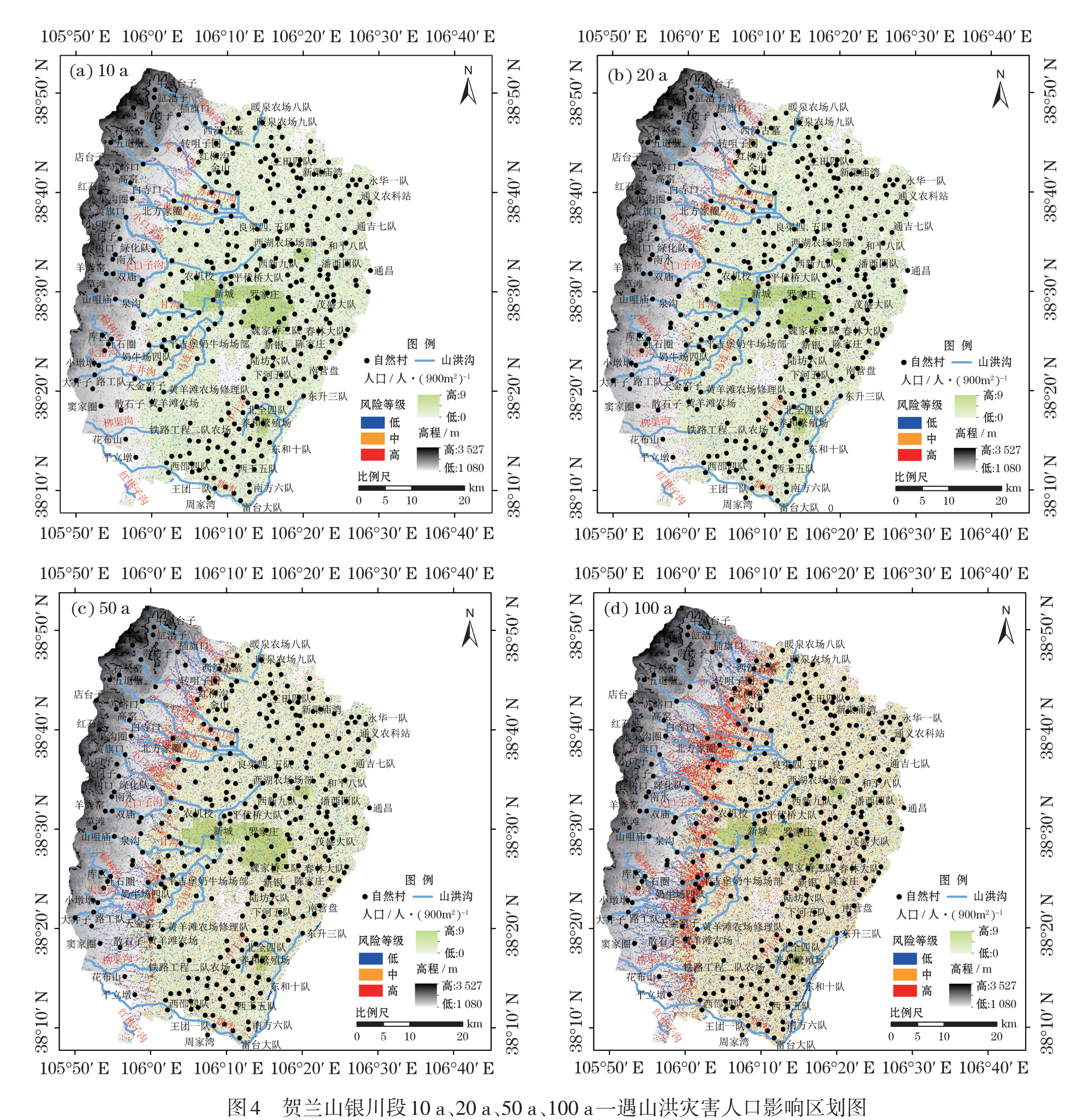


图4 贺兰山银川段10 a、20 a、50 a、100 a一遇山洪灾害人口影响区划图

Fig. 4 Impact zoning maps of 10 a, 20 a, 50 a and 100 a return period flash flood disasters on the population in Yinchuan section of Helan Mountain

贺兰山银川段10 a、20 a、50 a和100 a一遇山洪灾害影响总人口分别为7.30×10⁴人、9.87×10⁴人、1.65×10⁵人和2.39×10⁵人,表明随着山洪灾害重现期增大,贺兰山银川段受山洪灾害风险影响的总人口呈显著增加趋势。随山洪灾害重现期的增大,低、中、高风险区受影响人口增长速率之间存在显著差异,其中低风险区为-12.4%~20.5%,中风险区为48.6%~91.8%,高风险区为163%~300%。中、高风险区受影响人数占总受影响人数的比例迅速从10 a一遇的2.0%上升到100 a一遇的33.0%,表明随着山洪重现期增大,受高风险区影响的人口占比呈快速增大趋势,总体上受灾害风险影响人口的增速具有高风险区>中风险区>低风险区的特点。

2.3　山洪灾害土地利用影响区划

图5是叠加了整个区域土地利用数据,经过空间统计分析后得出的贺兰山银川段10 a、20 a、50 a、100 a一遇山洪灾害对土地利用影响区划图。当发生10 a一遇山洪灾害时,整个区域受山洪灾害影响的各类土地总面积为1.68×10^4 hm²;其中,农田、草地受影响最大,受影响面积分别为0.95×10^4 hm²、0.44×10^4 hm²,其他类型土地受影响面积在0.01×10^4~0.14×10^4 hm²之间。发生20 a一遇山洪灾害时,各类

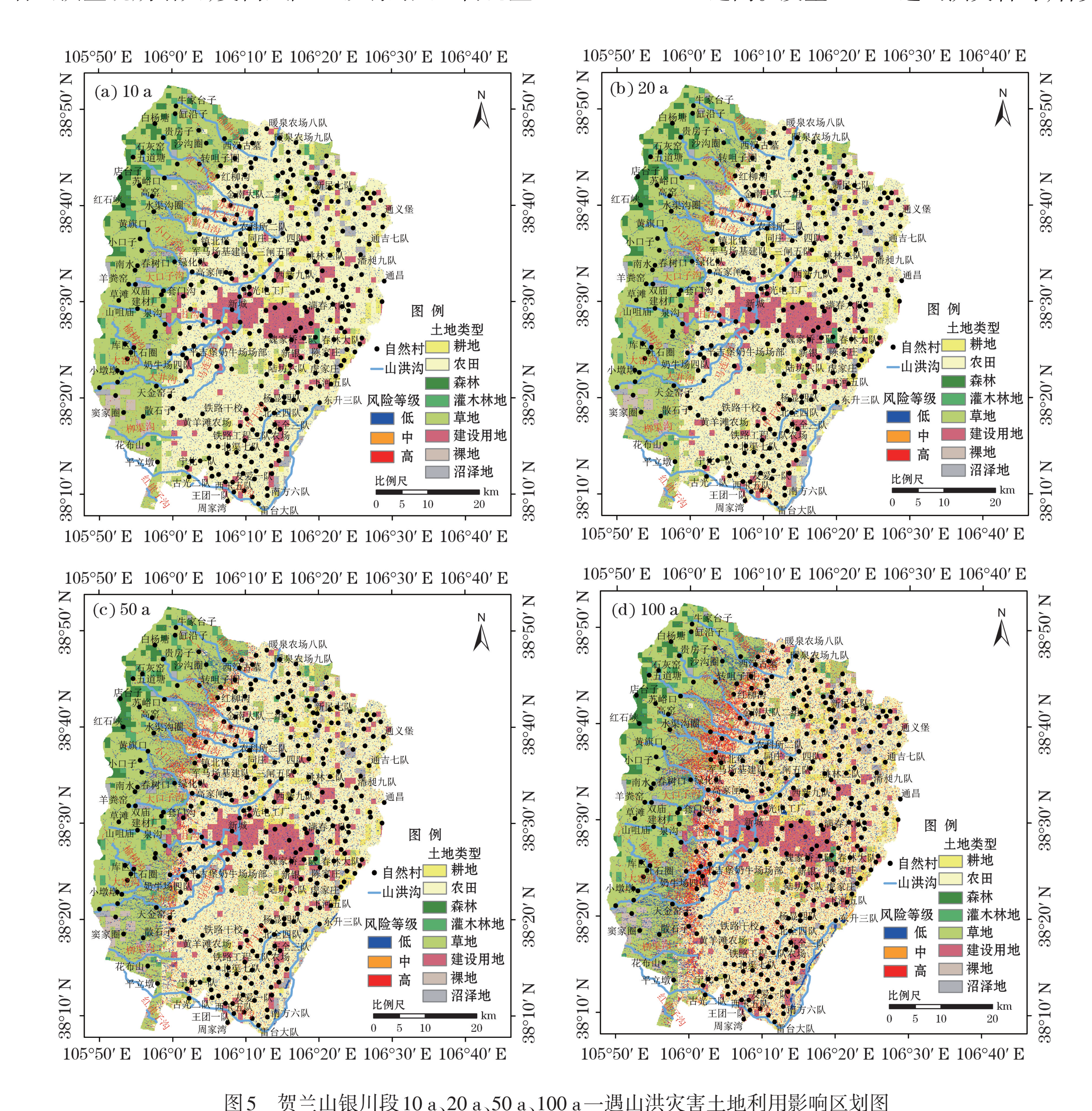


图5　贺兰山银川段10 a、20 a、50 a、100 a一遇山洪灾害土地利用影响区划图

Fig. 5　Impact zoning maps of 10 a, 20 a, 50 a and 100 a return period flash flood disasters on the land use in Yinchuan section of Helan Mountain

土地受影响总面积为2.44×10⁴ hm²;其中农田、草地受影响面积分别为1.34×10⁴ hm²、0.68×10⁴ hm²,森林和灌木林地受影响相对较小、均不到0.04×10⁴ hm²。发生50 a一遇山洪灾害时,贺兰山东麓银川段有4.37×10⁴ hm²的各类土地受到影响;农田、草地、耕地排名前三,受影响面积依次为2.43×10⁴ hm²、1.24×10⁴ hm²、0.16×10⁴ hm²。当发生罕见的100 a一遇山洪灾害时,受影响的土地面积为6.14×10⁴ hm²;其中农田、草地、耕地受影响面积分别为3.71×10⁴ hm²、1.48×10⁴ hm²、0.23×10⁴ hm²,共计5.42×10⁴ hm²。

对不同山洪灾害重现期下不同土地利用类型在低、中、高风险影响区中所占比例的统计结果显示(表1),农田、草地受贺兰山山洪灾害影响最大,二者合计占受山洪灾害影响土地总面积的82.1%~86.9%;建设用地和耕地次之,两者占受影响土地总面积的比例分别为4.4%~9.1%和1.1%~4.6%;沼泽地、灌木林地、裸地、森林受山洪灾害影响相对较小,占比分别仅为1.6%~3.9%、1.0%~3.5%、0.5%~1.9%、0.1%~1.6%。综合以上分析结果,可知当发生山洪灾害时,贺兰山银川段山洪沟下游和沿山的农田、草地、建设用地、耕地受影响较大,是银川市贺兰山山洪灾害防灾减灾工作的重点区域。

2.4 山洪灾害对国内生产总值影响区划

为进一步分析山洪灾害对社会经济的影响,图6给出了贺兰山银川段10 a、20 a、50 a、100 a一遇山洪灾害对整个区域国内生产总值(GDP)影响区划图。可以看出,10 a一遇山洪灾害对贺兰山东麓山洪沟中下游两侧的农业产业影响较大,低、中、高风险区受影响GDP分别为2.29×10⁹元、9.80×10⁸元、1.40×10⁸元。20 a一遇山洪灾害对山洪沟下游两侧村庄的基础设施和农业产业影响最大,低、中、高风险区受影响的GDP分别为2.60×10⁹元、1.65×10⁹元、3.50×10⁸元。发生50 a一遇山洪灾害时,不仅银川市贺兰山沿山的大部分农业产业会受到较大影响,靠近山洪沟的部分工矿企业也会受到影响,低、中、高风险区受影响的GDP分别为3.15×10⁹元、3.21×10⁹元、1.49×10⁹元。当出现极为罕见的100 a一遇山洪灾害时,银川市贺兰山沿山全部的农业和工业产业、基础公共设施等都会受到严重影响,低、中、高风险区受影响的GDP分别为2.79×10⁹元、4.75×10⁹元、3.99×10⁹元。综上所述,随着山洪灾害重现期增大,贺兰山银川段受影响GDP总值呈显著增大趋势,尤其是中、高风险区受影响GDP增速最快,平均增长率分别达70%和214%。

表1 贺兰山银川段山洪灾害影响土地总面积中不同类型土地所占比例统计表

Tab. 1 Statistical table of the proportion of different land use type in the total impact land area of flash flood disasters in Yinchuan section of Helan Mountain

风险等级	T年一遇	土地利用类型占比 / %							
		农田	森林	草地	灌木林地	沼泽地	耕地	建设用地	裸地
低风险	10 a	59.6	0.2	22.8	1.4	2.6	4.5	8.4	0.5
	20 a	61.4	0.1	21.0	1.2	2.2	4.3	9.1	0.7
	50 a	50.2	0.3	33.8	1.8	2.8	3.7	6.3	1.1
	100 a	49.7	0.3	33.5	1.8	3.5	3.9	6.2	1.2
中风险	10 a	58.2	0.1	24.2	1.4	2.3	4.1	8.9	0.9
	20 a	36.6	0.5	48.5	2.5	2.9	1.8	5.8	1.5
	50 a	63.7	0.1	19.0	1.1	2.3	4.6	8.9	0.5
	100 a	64.2	0.1	19.0	1.1	2.2	4.6	8.4	0.5
高风险	10 a	24.3	0.8	60.2	3.5	3.9	1.1	4.4	1.9
	20 a	52.5	1.6	29.6	2.1	2.1	4.0	7.3	1.0
	50 a	55.1	0.2	31.5	1.4	1.9	2.4	6.7	0.8
	100 a	65.3	0.1	21.7	1.0	1.6	3.0	6.9	0.5

3 结 论

(1) 贺兰山银川段山洪灾害低、中、高风险区面积10 a一遇分别为109.5 km²、45.0 km²、13.4 km²,20 a一遇分别为142.6 km²、73.7 km²、27.9 km²,50 a一遇分别为205.8 km²、145.0 km²、86.7 km²,100 a一遇分别为276.3 km²、231.0 km²、204.3 km²。总体上,贺兰山银川段同一重现期下山洪灾害区划面积随着风险等级增大而显著减小;在相同风险等级下,

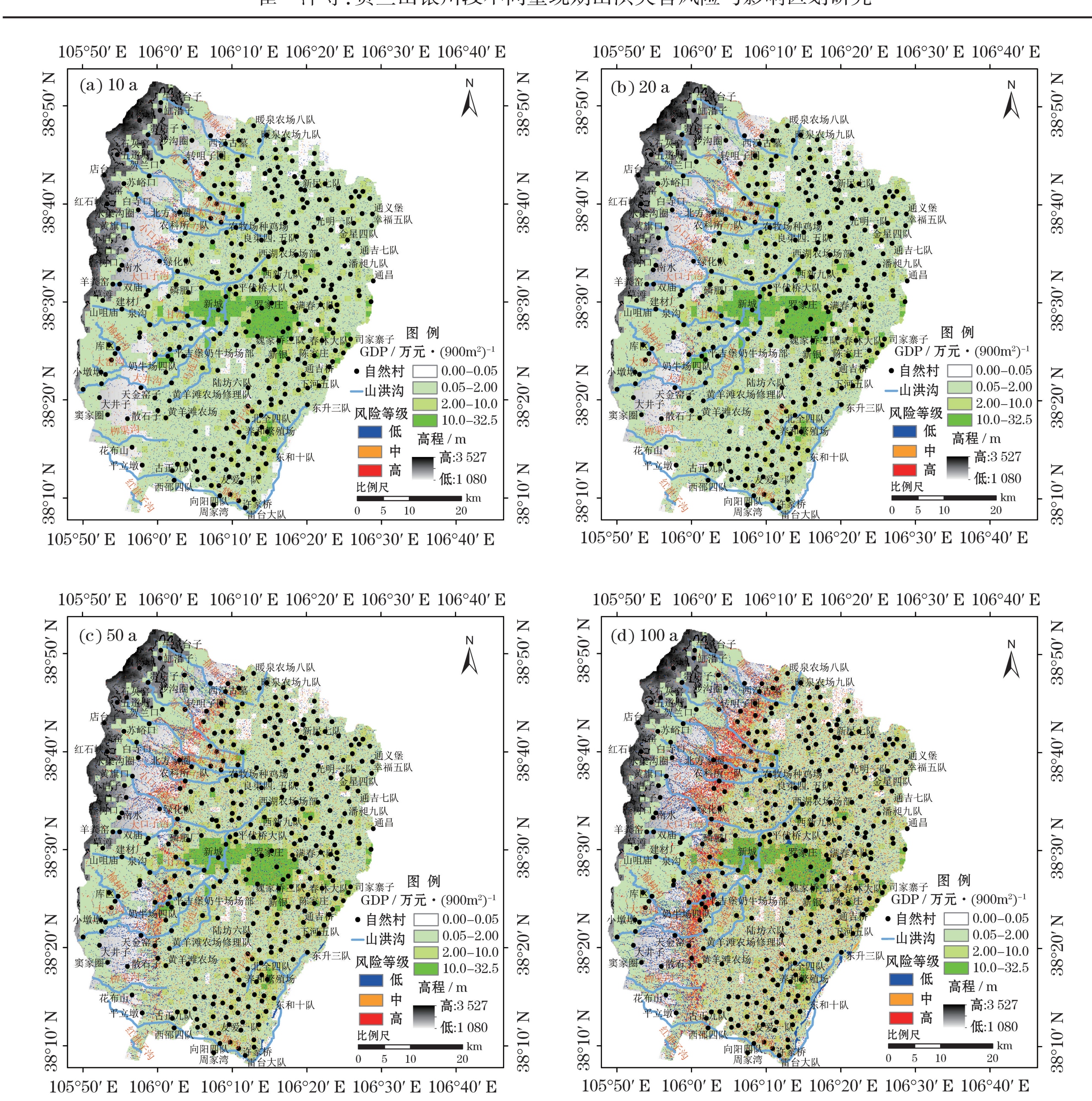


图6　贺兰山银川段10 a、20 a、50 a、100 a一遇山洪灾害国内生产总值(GDP)影响区划图

Fig. 6　Impact zoning maps of 10 a, 20 a, 50 a and 100 a return period flash flood disasters on the gross domestic product (GDP) in Yinchuan section of Helan Mountain

贺兰山银川段山洪灾害风险区划面积随着重现期的增大呈显著增大趋势。

(2) 贺兰山银川段山洪灾害低、中、高风险区具有以下空间特征：海拔1 130～1 450 m的山洪沟及其两侧区域属于10 a和20 a一遇山洪灾害风险区；贺兰山东麓海拔1 180～1 350 m的山洪沟、山前海拔1 130～1 180 m的大部分冲击扇区属于50 a一遇山洪灾害风险高发区；100 a一遇山洪灾害风险区覆盖整个山前海拔1 120～1 350 m的区域和冲击扇区。随着山洪重现期增大，贺兰山银川段山洪灾害风险区具有同时向高(低)海拔地区延伸，向下游低海拔地区扩展更快的特点。

(3) 银川市受贺兰山10 a、20 a、50 a和100 a一遇山洪灾害影响总人口分别为7.30×10⁴人、9.87×10⁴人、1.65×10⁵人和2.39×10⁵人。随着山洪灾害重现期增大，受影响总人口呈显著增加趋势，低、中、高风险区受影响人口增速分别在−12.4%～20.5%、48.6%～91.8%、163%～300%之间，受山洪灾害风险影响人口的增速总体上呈现出高风险区>中风险区>低风险区的变化特征。

(4) 农田、草地受贺兰山山洪灾害影响最大,二者合计占受影响土地总面积的比例在82.1%~86.9%之间;其次是建设用地和耕地,两者占受影响土地总面积的比例分别在4.4%~9.1%和1.1%~4.6%之间。发生山洪灾害时,山洪沟下游和沿山的农田、草地、建设用地、耕地是银川市开展贺兰山山洪灾害防灾减灾工作的重点区域。

(5) 银川市受贺兰山10 a、20 a、50 a、100 a一遇山洪灾害中、高风险区影响的GDP合计分别为1.12×10^9元、2.00×10^9元、4.70×10^9元、8.74×10^9元。随着山洪灾害重现期增大,银川市受影响GDP总值呈显著增大趋势。发生100 a一遇山洪灾害时,银川市贺兰山沿山全部的农业和工业产业、基础公共设施等都会受到严重影响。

参考文献(References)

[1] 唐邦兴,崔鹏. 山洪泥石流滑坡灾害及防治[M]. 北京:科学出版社, 1994: 1-10.[TANG Bangxing, CUI Peng. Debris flow and slide hazards and countermeasures[M]. Beijing: Science Press, 1994: 1-10.]

[2] 赵士鹏. 中国山洪灾害系统的整体特征及其危险度区划的初步研究[J]. 自然灾害学报, 1996, 5(3): 93-99.[ZHAO Shipeng. An elementary study on whole characteristics of mountain torrents disaster system in China and its hazard regionalization[J]. Journal of Natural Disasters, 1996, 5(3): 93-99.]

[3] 赵士鹏. 基于GIS的山洪灾情评估方法研究[J]. 地理学报, 1996, 51(5): 471-479.[ZHAO Shipeng. An integration of GIS and analytical models for evaluation of disasters caused by mountain torrents[J]. Acta Geographica Sinica, 1996, 51(5): 471-479.]

[4] 张平仓,任洪玉,胡维忠,等. 中国山洪灾害防治区划初探[J]. 水土保持学, 2006, 20(6): 196-200.[ZHANG Pingcang, REN Hongyu, HU Weizhong, et al. An elementary study on Chinese mountain torrents disaster prevention regionalization[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2006, 20(6): 196-200.]

[5] 孙东亚,张红萍. 欧美山洪灾害防治研究进展及实践[J]. 中国水利, 2012, 12(23): 16-17.[SUN Dongya, ZHANG Hongping. Research progress and practice of flash flood prevention in Europe and America[J]. China Water Resources, 2012, 12(23): 16-17.]

[6] 国家防汛抗旱总指挥部办公室. 全国山洪灾害防治项目实施方案(2016—2020)编制大纲[R]. 2015.[State Flood Control and Drought Prevention Office. Outline for the implementation plan of national mountain torrent disaster prevention project (2016-2020)[R]. 2015.]

[7] 张红萍. 山区小流域洪水风险评估与预警技术研究[D]. 北京:中国水利水电科学研究院, 2013.[ZHANG Hongping. Study on the flood risk management and technology of the small mountain watershed[D]. Beijing: China Institute of Water Resource and Hydro-power Research, 2013.]

[8] RICHARDS B D.洪水的估算与控制[M]. 北京:水利电力出版社, 1958.[RICHARDS B D. Flood estimation and control[M]. Beijing: China Water & Power Press, 1958.]

[9] ELDEEN M. Predisaster physical planning: Integration of disaster risk analysis into physical planning: A case[J]. Disasters, 1980, 4(2): 211-222.

[10] WIECZOREK G F. Evaluating danger landslide catalogue map[J]. Bulletin of the Association of Engineering Geologists, 1984, 1(1): 337-342.

[11] ELLEN S D, WIECZOREK G F. Landslides, floods, and marine effects of the storm of January 3-5, 1982, in the San Francisco Bay region, California[R]. Geological Survey(US), 1988.

[12] GUZZETTI F, STARK C P, SALVATI P. Evaluation of flood and landslide risk to the population of Italy[J]. Environmental Management, 2005, 36(1): 15-36.

[13] CAPELLO M, CUTRONEO L, FERRETTI G, et al. Changes in the physical characteristics of the water column at the mouth of a torrent during an extreme rainfall event[J]. Journal of Hydrology, 2016, 541(12): 146-157.

[14] 赵士鹏. 山洪灾情评估的系统集成方法研究[D]. 北京:中国科学院地理研究所, 1995.[ZHAO Shipeng. Studies on system integration method for assessment of disasters caused by mountain torrents[D]. Beijing: Institute of Geographic Sciences and Natural Resources Research, CAS, 1995.]

[15] 姜付仁,向立云. 洪水风险区划方法与典型流域洪水风险区划实例[J]. 水利发展研究. 2002, 2(7): 27-30.[JIANG Furen, XIANG Liyun. Zonation methodology of flood risk and its case study for typical basin[J]. Water Resources Development Research, 2002, 2(7): 27-30.]

[16] 王劲峰. 中国自然灾害区划—灾害区划、影响评价、减灾对策[M]. 北京:中国科学技术出版社, 1995.[WANG Jingfeng. China natural disaster zoning-disaster zoning, impact assessment, disaster mitigation countermeasures[M].Beijing: China Science and Technology Press, 1995.]

[17] 张行南,罗健,陈雷,等. 中国洪水灾害危险程度区划[J]. 水利学报, 2000, 31(3): 1-7.[ZHANG Xingnan, LUO Jian, CHEN Lei, et al. Zoning of Chinese flood hazard risk[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2000, 31(3): 1-7.]

[18] 谭徐明,张伟兵,马建明,等. 全国区域洪水风险评价与区划图绘制研究[J]. 中国水利水电科学研究院学报, 2004, 2(1): 50-60.[TAN Xuming, ZHANG Weibin, MA Jianming, et al. Research on regional assessment of flood risk and regionalization mapping in China[J]. Journal of China Institute of Water Resources and Hydropower Research, 2004, 2(1): 50-60.]

[19] 田丰,张军,冉有华,等. 不同空间尺度的山洪灾害风险评价模型对比研究[J]. 干旱区地理, 2019, 42(3) 559-569.[TIAN Feng, ZHANG Jun, RAN Youhua, et al. Model comparison of mountain torrent disaster risk assessment in different spatial scale[J]. Arid Land Geography, 2019, 42(3): 559-569.]

[20] 杜俊,任洪玉,林庆明,等. 山洪灾害防御研究进展[J]. 灾害

学,2019,34(2):161 - 167.[DU Jun,REN Hongyu,LIN Qingming,et al. Research progress on the prevention of flash flood Disasters[J]. Journal of Catastrophology,2019,34(2):161 - 167.]

[21] 刘少军,张京红,张明洁,等. 海南岛山洪灾害风险区划研究[J]. 水土保持研究,2013,20(5):165 - 169. [LIU Shaojun,ZHANG Jinghong,ZHANG Mingjie,et al. Research on risk zonation of mountain torrent disasters in Hainan island[J]. Research of Soil and Water Conservation,2013,20(5):165 - 169.]

[22] 宫清华,黄光庆,郭敏,等. 基于GIS技术的广东省洪涝灾害风险区划[J].自然灾害学报,2009,18(1): 58 - 63.[GONG Qinghua,HUANG Guangqing,GUO Min,et al. GIS-based risk zoning of flood hazard in Guangdong Province[J]. Journal of Natural Disasters,2009,18(1):58 - 63.]

[23] 岳琦,张林波,刘成程,等. 基于GIS的福建闽江上游山洪灾害风险区划[J]. 环境工程技术学报. 2015,5(4):293 - 298. [YUE Qi,ZHANG Linbo,LIU Chengcheng,et al. GIS-based risk zoning of flood disasters in upstream of the Minjiang River[J]. Journal of Environmental Engineering Technology,2015,5(4):293 - 298.]

[24] 唐川,朱静. 基于GIS的山洪灾害风险区划[J]. 地理学报,2005,60(1):87 - 94.[TANG Chuan,ZHU Jing. A GIS based regional torrent risk zonation[J]. Acta Geographica Sinica,2005,60(1):87 - 94.]

[25] 丁文峰,杜俊,陈小平,等. 四川省山洪灾害风险评估与区划[J].长江科学院院报,2015,32(12):41 - 45.[DING Wenfeng,DU Jun,CHEN Xiaoping,et al. Risk assessment and regionalization of mountain torrent disaster in Sichuan Province[J]. Journal of Yangtze River Scientific Research Institute,2015,32(12):41 - 45.]

[26] 邹朝望,孙媛媛,谢伯承. 湖南省洪涝灾害风险评估研究[J]. 人民长江,2010,41(11):63 - 65.[ZOU Chaowang,SUN Yuanyuan,XIE Bocheng. Study on risk evaluation of flood disaster in Hunan Province[J]. Yangtze River,2010,41(11):63 - 65.]

[27] 刘敏,杨宏青,向玉春. 湖北省雨涝灾害的风险评估与区划[J]. 长江流域资源与环境,2002,11(5):476 - 481.[LIU Min,YANG Hongqing,XIANG Yuchun. Risk assessment and regionalization of waterlogging disasters in Hubei Province[J]. Resources and Environment in the Yangtze Basin,2002,11(5):476 - 481.]

[28] 管岷,陈兴旺. 江西省山洪灾害风险区划初步研究[J]. 暴雨灾害,2007,26(4):339 - 343.[GUAN Min,CHEN Xingwang. Research of regional torrent risk zonation in Jiangxi Province[J]. Torrential Rain and Disasters,2007,26(4):339 - 343.]

[29] 谢五三,田红,卢燕宇. 基于FloodArea模型的大通河流域暴雨洪涝灾害风险评估[J]. 暴雨灾害,2015,34(4):384 - 387. [XIE Wusan,TIAN Hong,LU Yanyu. Risk evaluation of rainstorm and flood disasters in Datong River basin based on the FloodArea model[J]. Torrential Rain and Disasters,2015,34(4):384 - 387.]

[30] 王胜,吴蓉,谢五三,等. 基于Floodarea的山洪灾害风险区划研究——以淠河流域为例[J]. 气候变化研究进展,2016,12(5):432 - 441.[WANG Sheng,WU Rong,XIE Wusan,et al. Rainstrom-induced mountain flood disaster risk zoning based on FloodArea inundation model:Taking Pihe River valley as a case[J]. Climate Change Research,2016,12(5):432 - 441.]

[31] 曹罗丹,李加林. 基于遥感与GIS的浙江省洪涝灾害综合风险评估研究[J].自然灾害学报,2015,24(4):111 - 119.[CAO Luodan,LI Jialin. Integrated risk assessment of flood disaster in Zhejiang Province based on RS and GIS[J]. Journal of Natural Disasters,2015,24(4):111 - 119.]

[32] 张洪玲,宋丽华,刘赫男,等. 黑龙江省暴雨洪涝灾害风险区划[J].中国农业气象,2012,33(4):623 - 629. [ZHANG Hongling,SONG Lihua,LIU Henan,et al. Risk zoning of flood and waterlog in Heilongjiang Province[J]. Chinese Journal of Agrometeorology,2012,33(4):623 - 629.]

[33] 周金星. 山洪及泥石流灾害空间预报技术研究[J]. 水土保持学报,2001,15(2):112 - 116.[ZHOU Jinxing. Technique of space prediction on flush flood and debris flow disaster[J]. Journal of Soil and Water Conservation,2001,15(2):112 - 116.]

[34] 张世才,褚建华,张同泽. 祁连山区山洪灾害临界雨量计算和风险区划分[J]. 水土保持学报,2007,21(5):196 - 200. [ZHANG Shicai,CHU Jianhua,ZHANG Tongze. Calculation of critical rainfall amounts and risk area partition of flood disaster in Qilian mountain area[J]. Journal of soil and Water Conservation,2007,21(5):196 - 200.]

[35] 李永红. 基于ArcGIS的陕西山洪灾害易发程度区划[J]. 灾害学,2008,23(1):37 - 42.[LI Yonghong. Susceptible degree zoning of mountain torrent disasters in Shaanxi based on ArcGIS[J]. Journal of Catasirophology,2008,23(1):37 - 42.]

[36] GEMMER M. Decision support for flood risk management at the Yangtze River by GIS/RS based flood damage estimation [M]. Giessen:Shaker,2004:108 - 127.

[37] GEOMER G H. Floodarea-ArcGIS extension for calculating flooded areas(User mannual Version 9.5)[M]. Heidelberg:Geomer,2008.

[38] 苏布达,姜彤,郭业友,等. 基于GIS栅格数据的洪水风险动态模拟及应用[J]. 河海大学学报(自然科学版),2005,33(4):370 - 374.[SU Buda,JIANG Tong,GUO Yeyou,et al. GIS raster data-based dynamic flood risk simulation model and its application[J]. Journal of Hohai University(Natural Sciences),2005,33(4):370 - 374.]

[39] GEOMER. Floodarea-Arcview extension for calculating flooded areas (User manual Version 2.4)[M]. Heidelberg:Heidelberg University,2003.

Risk and impact zoning of different return period flash flood disasters in Yinchuan Section of Helan Mountain

CUI Yang[1,2], CHANG Zhuo-lin[1,3], ZUO He-jiang[1,2], WANG Jian-ying[1]

(1 *Key Laboratory of Meteorological Disaster Preventing and Reducing in Ningxia*, *Yinchuan* 750002, *Ningxia*, *China*;

2 *Ningxia Climate Center*, *Yinchuan* 750002, *Ningxia*, *China*;

3 *Ningxia Meteorological Disaster Prevention Technology Center*, *Yinchuan* 750002, *Ningxia*, *China*)

Abstract: In order to assess the impacts and risks associated with flash flood disasters in the Yinchuan section of the Helan Mountain, Ningxia Province, China, we considered a high-resolution digital elevation model (DEM), as well as information on the administrative divisions, the distribution of torrents, the historical precipitation data from automatic weather stations, and socioeconomic information (e.g., on residential areas, schools, and bridges). The risk distribution characteristics of flash flood disasters over the Yinchuan section of the Helan Mountain and their impact on the population, land use, and gross domestic product (GDP) were analyzed and assessed by a FloodArea model simulation and an ArcGIS spatial overlay statistical analysis. The results showed the following: (1) The areas subjected to a low, medium, and high risk of flash flood disasters with a return period of 10–100 a were of 109.5–276.3 km^2, 45.0–231.0 km^2, and 13.4–204.3 km^2, respectively; moreover, the zoning areas of flash flood disasters with the same risk level showed a significant increase with the lengthening of the return period. (2) The areas of the Helan Mountain subjected to the risk of flash flood disasters with return periods of 10 a and 20 a were mainly located in correspondence and on the sides of flood ditches (at altitudes of 1 130–1 450 m); moreover, those subjected to the risk of flash flood disasters with return periods of 50 a were mainly located downstream of the flood ditches and in correspondence of an impact fan along the mountain front (at altitudes of 1 130–1 180 m). The areas at risk of flash flood disasters with return periods of 100 a were located at altitudes of 1 120–1 350 m and in correspondence of the impact fan along the mountain front. Overall, with the increase of the return period, the zones of the Helan Mountain at risk of flash flood disasters showed a significant slow (fast) expansion toward the upstream (downstream) area. (3) In Yinchuan City, ~73 000, 98 700, 165 300, and 239 000 people will be affected by flash flood disasters with return periods of 10 a, 20 a, 50 a, and 100 a, respectively. With the increase of the return period of flash flood disasters, the number of people affected by them and living around the Helan Mountain grew significantly (growth rates: −12.4% to 20.5%, 48.6% to 91.8%, and 163% to 300% in the low, medium, and high risk areas, respectively). (4) Farmlands and grasslands were the most affected by flash flood disasters that originated on the Helan Mountain: together, they accounted for 82.1%–86.9% of the total affected area. They were followed by construction and cultivated lands, which accounted for 4.4%–9.1% and 1.1%–4.6% of the total affected area, respectively. These lands are key for the prevention of flash flood disasters (originated on the Helan Mountain) in Yinchuan City. (5) In Yinchuan City, the total GDP was affected by flash flood disasters with return periods of 10 a, 20 a, 50 a, and 100 a that occurred in medium- and high-risk areas. The GDP losses corresponded to 1.12 billion, 2.00 billion, 4.70 billion, and 8.74 billion yuan, respectively. In case of flash flood disasters with return periods > 50 a, the agricultural/industrial industries, infrastructures, and public facilities located in Yinchuan City (close to the mountain) will suffer great economic losses.

Key words: flash flood disaster; risk and impact zoning; FloodArea model; ArcGIS; Yinchuan section of Helan Mountain